

# Pioniere unter den GRÜNEN MINILASERN

Erst im vergangenen Jahr gelang die Herstellung von Halbleiterlasern, die reines grünes Licht aussenden. Dank des rasant wachsenden Methodenarsenals der Forscher geht die Entwicklung nun aber immer schneller voran. Bald werden Laserprojektoren mit brillantem Licht das ganze optische Spektrum abdecken.

## In Kürze

- ▶ Schon seit längerer Zeit können **Halbleiterlaser** rotes und blaues Licht emittieren. Die »grüne Lücke« wurde aber erst vor wenigen Monaten geschlossen.
- ▶ Die Forschung ist dennoch längst nicht beendet. Zahlreiche Wissenschaftlerteams arbeiten an **unterschiedlichen Ansätzen**, um die Laserdioden zu optimieren.
- ▶ Sobald die **Produkte kommerziell verfügbar** sind, können sie beispielsweise zur Erzeugung brillanter Laserprojektionen dienen.

Von Shuji Nakamura und Michael Riordan

**A**n einem verregneten Samstagmorgen im Januar 2007 ging für den Präsidenten der University of California in Santa Barbara (UCSB) ein dringender Telefonanruf ein. Abrupt verabschiedete sich Henry Yang aus einer Sitzung, schnappte Regenmantel und Schirm und eilte über den windgepeitschten Campus der UCSB zu deren Solid State Lighting and Display Center (SSLDC). Als er das Zentrum erreichte, wimmelte es in dem kleinen Testlabor von Leuten, »und auch Shuji war gerade eingetroffen«, erinnert sich Yang.

Shuji Nakamura, einer der Autoren dieses Beitrags, gehört dem zweiköpfigen Direktorium des mittlerweile in SSLEC (Solid State Lighting and Energy Center) umbenannten Instituts an. Mitfinanziert von rund einem Dutzend Partnerunternehmen weltweit, widmet es sich der Herstellung von Halbleitermaterialien, die möglichst effizient und kontrolliert Licht abgeben sollen.

Schon Mitte 2006 war Nakamura mit dem Millennium Technology Prize für seine mittlerweile über ein Jahrzehnt zurückliegende Erfindung der ersten leistungsfähigen, blau strah-

lenden Leuchtdioden (LEDs) ausgezeichnet worden und leistet seit diesem Durchbruch weiter Pionierarbeit auf dem Gebiet der Lichterzeugung auf Halbleiterbasis. Neben grünen LEDs entwickelte er auch blaue Laserdioden, wie sie in Abspielgeräten für Blu-ray-Medien, den hochauflösenden Nachfolgern der DVDs, unverzichtbar sind.

An jenem Samstag waren auch Nakamuras Kollegen Steven DenBaars, ebenfalls SSLDC-Direktor, und James C. Speck in das Testlabor gekommen und diskutierten dort mit aufgeregten Studenten und Postdocs, während sie der Reihe nach Blicke durch ein Mikroskop warfen. Dann machten sie Platz für Yang, und als auch er durch das Okular sah, wurde er Zeuge eines hellen, blauviolettten Blitzes, ausgesandt von einem Chip mit glatter, glänzender Oberfläche aus Galliumnitrid (GaN).

Der Universitätspräsident war beeindruckt. An sich sind blaue Laserdioden zwar nicht revolutionär. Doch Unternehmen wie Nichia Chemical Industries im japanischen Tokushima, wo Nakamura bis zum Jahr 2000 tätig gewesen war, und Sony waren noch immer verzweifelt auf der Suche nach Verfahren, welche die Herstellung kostengünstiger GaN-Laser für den Blu-ray-Markt erlaubten. Denn

bislang hatten sie bei der Produktion der Dioden mit hartnäckigen Problemen gekämpft, so dass die Stückzahlen gering und die Laserdioden teuer blieben. Wenige Tage später war aber klar: Das Kunststück ließ sich wiederholen. Einer Forschergruppe der Rohm Company im japanischen Kioto, die schon damals zu den Partnern des Instituts gehörte, war der Effekt mit einem ähnlichen Material gelungen.

### Hoffnung auf den Durchbruch

Die Wissenschaftler an der UCSB und bei Rohm arbeiten an neuen Methoden zur Herstellung leistungsfähiger Laserdioden aus aufeinandergeschichteten kristallinen Lagen aus Galliumnitrid und seinen Legierungen. Hinter ihren Anstrengungen steht vor allem aber auch die Hoffnung, bald robuste und kompakte GaN-Dioden herstellen zu können, die grünes Laserlicht aussenden und sich im industriellen Maßstab produzieren lassen.

Die »grüne Lücke« in der Triade aus Rot, Grün und Blau, die man zur vollständigen Darstellung realistischer Farben benötigt, bereitet Wissenschaftlern wie Ingenieuren schon lange Kopfzerbrechen. Sie ist das bislang größte Hindernis bei der Herstellung von Bild-

schirmen und Projektoren auf Basis von Halbleiterlasern. Gelingt den Forschern hier der Durchbruch – könnte also ein mit vernünftigem Aufwand herstellbarer und leistungsfähiger Halbleiterlaser im Wellenlängenbereich von 520 bis 535 Nanometern (milliardstel Meter, nm) strahlen (»True Green«) –, wären schon bald Laserprojektoren für Fernsehen und Kinos verfügbar, die bisherige Systeme durch ihren Farbreichtum weit übertreffen würden. Auch winzige »Pikoprojektoren«, wie sie schon jetzt in einem Handy Platz finden, würden dann höchste Qualität erreichen. Grüne Hochleistungsdioden könnten aber auch bei der DNA-Sequenzierung, der industriellen Fertigungskontrolle und selbst bei der Unterwasserkommunikation zum Einsatz kommen.

LEDs (siehe »Meilenstein für grüne Leuchtdioden«, SdW 1/2010, S. 16) und Laserdioden sind miteinander verwandt, aber nur Letztere erzeugen kohärentes Laserlicht. Ihre blau strahlenden Varianten existieren schon länger: Der entscheidende Schritt, um Halbleiter zur Emission von hellem, blauem Licht zu veranlassen, war bereits Mitte der 1990er Jahre erfolgt. Während sich die meisten Forscher zuvor auf Zinkselenid und damit verwandte Ver-

### GIBT ES GRÜNE LASER NICHT SCHON LÄNGST?

Tatsächlich sind Lasersysteme, die grünes Licht aussenden, bereits seit Jahren verfügbar – etwa in Form von Laserpointern, wie sie gerne bei Vorträgen genutzt werden. In ihnen regt eine Laserdiode einen Kristall dazu an, Strahlung mit einer Wellenlänge von 1064 Nanometern (nm) auszusenden. Deren Frequenz wird durch einen weiteren Kristall verdoppelt, so dass grünes Licht der Wellenlänge 532 nm entsteht. Doch das Verfahren ist aufwändig und ineffizient. Heißt sich der zweite Kristall auf, ändert sich zudem die Wellenlänge der Strahlung. Mit Halbleiterlaserdioden, die grünes Licht auf direktem Weg erzeugen, lassen sich diese Probleme lösen.

**Die Energie der Photonen lässt sich durch die Eigenschaften des Halbleitermaterials präzise steuern**

bindungen konzentriert hatten, begann man damals, zu ihrer Herstellung Galliumnitrid und seine Legierungen zu verwenden.

Zwischen zwei Sandwichschichten aus GaN kommt dabei eine extrem gleichmäßige, nur Nanometer dicke so genannte aktive Schicht aus Indiumgalliumnitrid (InGaN) zu liegen, wodurch ein so genannter Quantentopf entsteht. Dann erzeugen die Forscher ein elektrisches Feld senkrecht zu diesen Schichten. Dieses treibt Elektronen und »Löcher« – also Orte fehlender Elektronen, die sich wie ein positiv geladenes, bewegliches Quasiteilchen verhalten – aufeinander zu (Kasten unten).

In der so genannten aktiven Schicht aus InGaN rekombinieren die Elektronen und Löcher und erzeugen dabei Photonen mit einer Energie, die präzise durch die Eigenschaften des aktiven Halbleitermaterials gegeben ist. Durch eine Erhöhung des Indiumanteils der Legierung lässt sich diese Energie verringern und damit die Wellenlänge des abgestrahlten Lichts vergrößern. So kann man

die Farbe von Violett (welches das kurzwellige Ende des Spektrums markiert) über Blau zu Grün verschieben.

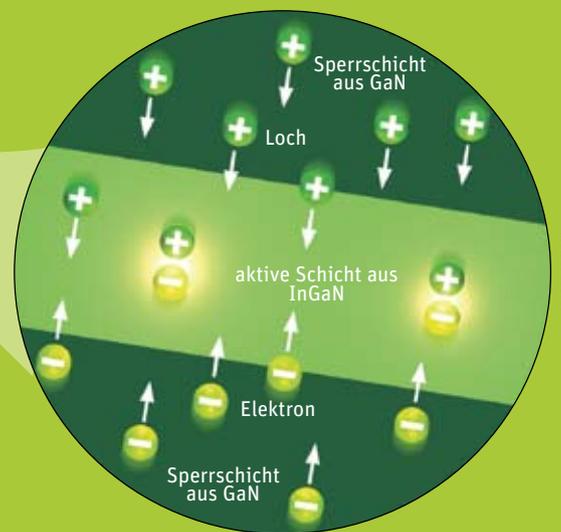
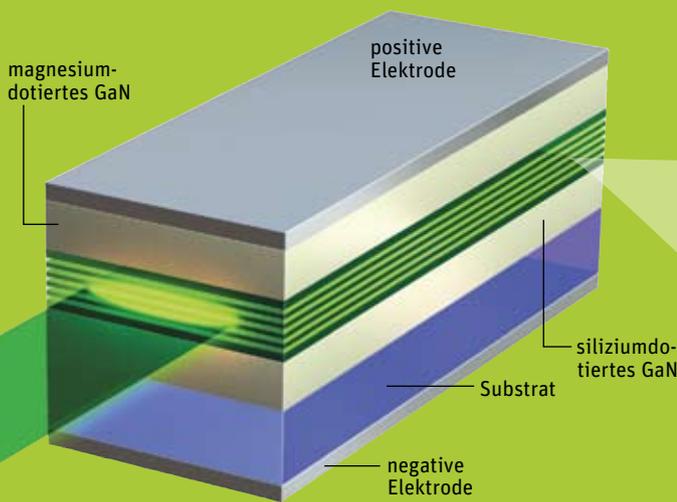
In LEDs entkommen die Photonen praktisch sofort aus dem Quantentopf. Sie prallen vielleicht ein- oder zweimal an dessen Wänden ab, bevor sie entweder in einer anderen Schicht absorbiert werden oder aber die Diode verlassen. Laserdioden hingegen erzeugen kohärentes Licht. In ihnen bleiben die meisten Photonen in der aktiven Schicht gefangen: Zwei hochreflektierende Spiegel – meist polierte Kristallflächen an deren Enden – werfen sie im Inneren hin und her und begünstigen dadurch weitere Elektron-Loch-Rekombinationen. Dank dieser so genannten stimulierten Emission tritt schließlich ein eng gebündelter Laserstrahl von großer Farbreinheit aus dem System aus.

Bei der Herstellung konventioneller GaN-Dioden kommt eine dünne Scheibe, ein so genannter Wafer, aus Saphir zum Einsatz. (Immer häufiger besteht er auch aus

**SO FUNKTIONIEREN HALBLEITERLASER**

**Im Inneren eines Festkörperlaser** treffen die negativ geladenen Elektronen auf so genannte Löcher. (Diese positiv geladenen Quasiteilchen entstehen dort, wo Elektronen angeregt wurden und eine »Lücke« hinterlassen haben.) Bei der Rekombination er-

zeugen sie Licht, dessen Wellenlänge von ihren jeweiligen Energiezuständen abhängt. Die Wellenlänge beeinflussen die Forscher, indem sie die Atomlagen des Halbleiters dotieren, ihnen also Fremdatome hinzufügen.



**SCHICHT FÜR SCHICHT**

Halbleiterlaser oder Laserdioden werden hergestellt, indem man Schichten aus halbleitendem Material auf ein Substrat aufbringt. Am unteren Ende eines solchen Halbleitersandwichs befindet sich oft mit Siliziumatomen dotiertes Galliumnitrid (GaN). Dadurch kommt es dort zu einem Überschuss an Elektronen. Am oberen Ende ist das GaN mit Magnesium dotiert, um einen Überschuss an positiven Ladungen oder »Löchern« zu erhalten. Eine an den Elektroden angelegte Spannung erzeugt dann ein elektrisches Feld, das Elektronen und Löcher in die aktiven Schichten (Mitte) aus Indiumgalliumnitrid (InGaN) treibt.

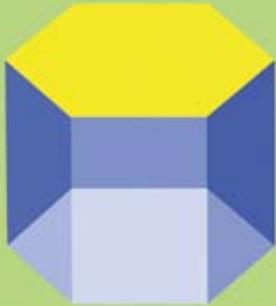
**INNERER WIDERSTREIT**

Im Inneren dieser aktiven Schichten rekombinieren Elektronen und Löcher paarweise und erzeugen dabei Licht. Die Wellenlänge dieses Lichts hängt vom Indiumanteil der aktiven Schicht ab: Mehr Indium (In) führt zu längeren Wellenlängen und somit, wenn die Ausgangsfarbe im blauen oder violetten Bereich liegt, zu grünem Licht. Doch je mehr Indium die Schichten enthalten, desto leichter sammelt es sich während der Herstellung zu kleinen Indium-»Inseln«. Wenn solche Inhomogenitäten die Wellenlänge des Lichts variieren lassen, kommt die Halbleiterstruktur nicht mehr als Laser in Frage.

## EINE NEUE GRUNDLAGE

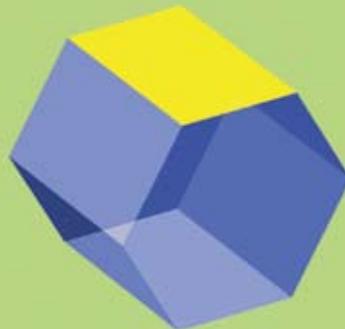
**BASIS DER HALBLEITERSTRUKTUREN** ist ein Substrat, eine aus einem Kristall geschnittene Scheibe, die den auf sie aufgebrauchten Atomlagen ihre kristalline Struktur »vererbt«. Die blauviolett strahlenden Diodenlaser, wie sie sich in Blu-ray-Playern befinden, sind gewöhnlich auf einem Saphirsubstrat gewachsen.

Diese Kristalle sind vergleichsweise billig und leicht erhältlich, für die Herstellung grüner Laserdioden aber nicht gut geeignet. Mittlerweile setzen die Forscher darum auf andere Substrate, die wiederum auf unterschiedliche Weise aus einem Kristall geschnitten werden.



### C-EBENE: DER KLASSISCHE SCHNITT

Bei der Herstellung blauer Laser finden meist c-Ebenen-Substrate Verwendung. Dabei wird der Ausgangskristall senkrecht zu dessen hexagonaler Symmetrieachse geschnitten. Doch in diesen Substraten entstehen elektrische Felder, die Elektronen und Löcher voneinander trennen. Je stärker die Wellenlänge in Richtung grün verschoben wird, desto größer wird dieses Problem.



### M-EBENE: DIE TEURE ALTERNATIVE

Laserdioden kann man auch auf der m-Ebene – einer Seitenfläche – eines Kristalls wachsen lassen. Dann leiden die Dioden kaum unter induzierten Feldern, aber diese nicht polaren Substrate sind erheblich teurer als ihre c-Ebenen-Pendants.



### DER SEMIPOLARE KOMPROMISS

Eine dritte Option ist das semipolare Substrat, bei dem der Schnitt unter einem Winkel von 45 Grad zur Kristallachse erfolgt. Die induzierten Felder sind etwas größer als im Fall der m-Ebenen-Substrate. Auch die jüngste Entwicklung der UCSB-Forscher, eine 506-nm-Laserdiode, basiert auf einem semipolaren Substrat.

GEORGE RETSECK

Galliumnitrid.) Dieser wird in einer Reaktionskammer mit entsprechenden Ausgangsmaterialien bedampft, so dass sich aufeinander folgende Schichten aus Gallium-, Indium- und Stickstoffatomen auf dem Substrat ablagern und dabei die von diesem vorgegebene kristalline Struktur annehmen. Atom für Atom wachsen die Schichten dann parallel zur so genannten c-Ebene des Substrats heran (siehe Kasten oben).

### Der Quantentanz bleibt aus

Allerdings führen elektrostatische Kräfte und innere Spannungen, die zwischen aufeinander folgenden Schichten positiv geladener Gallium- oder Indiumatome und negativ geladener Stickstoffatome entstehen, zur Bildung starker elektrischer Felder senkrecht zur c-Ebene. Diese Felder können eine Stärke von bis zu 100 Volt pro Mikrometer erreichen. So wenig das klingt: Umgerechnet auf die Größe eines Menschen entspricht das fast 200 Millionen Volt! Weil die Felder der von außen angelegten Spannung entgegenwirken, zerren sie die Elektronen von den Löchern weg, erschweren den Teilchen folglich die Rekombi-

nation und verringern damit die Lichtausbeute. Denn letztlich sammeln sich die Elektronen dann am einen Ende des Quantenballsals und die Löcher am anderen Ende – der Quantentanz bleibt aus.

Verschieben die Forscher die Farbe des abgestrahlten Lichts von Violett über Blau zu Grün, wird dieser störende *quantum-confined Stark effect* (Stark-Effekt mit Quanteneinschluss) sogar immer stärker. Und nimmt der Strom durch die Diode zu, schirmt die wachsende Anzahl der Ladungsträger einen Teil der inneren elektrischen Felder ab, die Elektronen und Löcher voneinander trennen. Diese verlieren daher weniger Energie bei der Überwindung der Felder, rekombinieren folglich bei höheren Energien, so dass sich auch die Frequenz des emittierten Lichts erhöht und seine Farbe zum blauen Ende des Spektrums verschiebt.

Solche Probleme sind der Hauptgrund dafür, dass grüne Laserdioden und hocheffiziente grüne LEDs auch im letzten Jahrzehnt ein Traum geblieben sind. Um sie zu umgehen, setzen die UCSB- und Rohm-Forscher auf eine besondere Herangehensweise. Ihr Wa-

**Umgerechnet auf die Größe eines Menschen entsprechen die internen Felder fast 200 Millionen Volt**

## HANDLICHE PROJEKTOREN

**Die derzeit erhältlichen Miniprojektoren** können Bilder mit einer Diagonale von bis zu 1,27 Meter (50 Zoll) erzeugen und werden als Pikoprojektoren bezeichnet (die Vorsilbe steht für Billionstel). Üblicherweise erreicht die Größe des Lichtstroms, also die erzielbare Helligkeit des projizierten Bilds, bis zu 15 Lumen. Die Geräte sind etwa so groß wie eine Fernbedienung und nutzen meist LEDs zur Lichterzeugung. Die ersten auf Laserdioden basierenden Modelle kommen derzeit ebenfalls auf den Markt. Grünes Laserlicht erzeugen sie zwar per Frequenzverdopplung, können aber schon jetzt hoch aufgelöste, farbenreiche Bilder darstellen. Zukünftige Modelle auf der Basis grüner Laserdioden werden bei geringerem Strombedarf noch hellere Projektionen ermöglichen. Manche LED-Modelle finden zudem schon Platz in einem Handy. Hier eine kleine, nicht vollständige Marktübersicht:

### MICROVISION SHOW WX

Im Inneren dieses Laserprojektor-Prototyps, der schon bald auf den Markt kommen dürfte, werden rote, blaue und grüne Laserstrahlen auf einen stecknadelkopfgroßen Spiegel fokussiert. Dieser bewegt sich rasch hin und her und scannt so das ganze Bild ab, das dann an eine Wand oder eine Leinwand projiziert wird. Für die Entwicklung des Spiegels zeichnet das Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme in Dresden verantwortlich. Grüne und blaue Laser bezieht das US-Unternehmen von der Regensburger OSRAM Opto Semiconductors GmbH. Da der Projektor keine Linsen enthält, muss er niemals scharf gestellt werden.

*Auflösung: 848 x 480 Pixel (DVD-Äquivalent)*



MICROVISION, INC.

### LIGHT BLUE OPTICS

Das Start-up-Unternehmen Light Blue Optics entwickelt ebenfalls einen Laserprojektor. Das Gerät basiert auf einem LCOS-Chip – Flüssigkristall auf Silizium –, der Tausende von kleinen Flüssigkristall-»Fenstern« enthält. Der Chip öffnet und schließt diese Pixel in rasanter Folge, um das Licht an den gewünschten Stellen durchzulassen und das Bild zu erzeugen. Derzeit steht die Auslieferung an Projektorenhersteller an.

*Auflösung: 854 x 480 Pixel*

### 3M MPRO120

Das LED-basierte Vorgängermodell MPro110 war 2008 der erste tragbare Projektor, der in den USA auf den Markt kam. Er ist zwar etwas größer als der Samsung MBP200 (unten), aber dafür kann der LCOS-Projektor Videos in Fernsehqualität projizieren.

*Auflösung: 640 x 480 Pixel (entspricht der Standardauflösung des Fernsehens)*



3M

### SAMSUNG MBP200 PIKOPROJEKTOR

Dieser ebenfalls LED-basierte Projektor ist seit März 2009 erhältlich und verwendet eine miniaturisierte Version des Digital Light Projection (DLP) Chips von Texas Instruments. Licht einer weißen LED tritt zunächst durch ein sich schnell bewegendes Farbrad. Dann trifft es auf ein Feld aus Tausenden von Spiegeln. Jeder dieser Spiegel ist nur ein Fünftel so groß wie der Durchmesser eines menschlichen Haars und wird mehrere tausendmal pro Sekunde an- und abgeschaltet. Das an den Spiegeln reflektierte Licht erzeugt dann die einzelnen Pixel des Bilds.

*Auflösung: 480 x 320 Pixel*



SAMSUNG

Weitere Projektoren unterschiedlicher Technik stammen etwa von Toshiba, BenQ oder Aiptek. Ziel der Entwicklung ist nun vor allem auch eine Erhöhung der Projektionshelligkeit, so dass auch bei weniger abgedunkelten Räumen helle Bilder entstehen. Hierzu muss allerdings der Energiebedarf gesenkt werden, schließlich sind die Geräte als mobile Begleiter konzipiert.



TOSHIBA CORP.

fer besteht aus reinem kristallinem GaN, das aus einem größeren Kristall entlang der m-Ebene (siehe Kasten S. 35) geschnitten und anschließend poliert wird. Dioden, die auf solchen so genannten nichtpolaren Substraten hergestellt werden, sind konventionellen, polaren c-Ebenen-Dioden überlegen, weil die störenden inneren Felder in ihnen sehr viel schwächer ausfallen.

Außerdem weisen auf GaN gewachsene Dioden gegenüber ihren Pendanten auf Saphirbasis weniger Defekte in ihrer Kristallstruktur auf. Rekombinieren Elektronen und Löcher an solchen submikroskopischen Unregelmäßigkeiten oder an so genannten Versetzungen – dort stört eine Halbebene die regelmäßige Kristallstruktur –, geben sie statt Licht Wärme ab, die zudem noch abgeführt werden muss. In die aktiven Bereiche gelangen diese Defekte, indem sie sich während des Wachstumsprozesses einfach durch die Schichten hindurch ausbreiten. (Als Nichia und Sony erstmals versuchten, blaue Laserdioden herzustellen, führte genau dieser Effekt zu einer verheerenden Ausschussrate.)

### Endlich exzellente Substrate

Die Idee zur Verwendung nichtpolarer Substrate war Ende der 1990er Jahre aufgekommen. An ihrer Umsetzung versuchten sich dann mehrere Forschergruppen, auch DenBaars und Speck an der UCSB gehörten zu ihnen, im Jahr 2000. Die ersten auf diese Weise produzierten Bauelemente lieferten allerdings nur geringe Leistung, vor allem weil es noch an hochwertigen GaN-Substraten mangelte. Ab dem Jahr 2006 aber konnte die Mitsubishi Chemical Corporation, ein weiterer Tokioter Partner des UCSB-Zentrums, den Teams exzellente m-Ebenen-Substrate aus GaN liefern, die nur noch wenige Defekte aufwiesen. Geschnitten wurden sie aus kleinen GaN-Kristallen von der Größe eines Bleistiftspitzers, und ihre Seitenlänge betrug nicht einmal einen Zentimeter.

Ende 2006 erlaubte das verbesserte Ausgangsmaterial den Rohm- und UCSB-Forschern, sehr viel effizientere LEDs als bisher herzustellen, so dass sie sich – auf Basis derselben Substrate – Anfang 2007 an die Produktion der technisch anspruchsvolleren Laserdioden machen konnten. Und an jenem verregneten Samstagmorgen, dem 27. Januar 2007, stellte sich der Erfolg ein. Matthew Schmidt hatte gerade den letzten Fertigungsschritt vollzogen. Und als der UCSB-Doktorand mit der fertigen Diode ins benachbarte Testlabor ging, sie an eine Spannungsquelle anschloss und den Stromfluss langsam erhöhte, schoss plötzlich ein gebündelter Strahl

blauviolett Licht aus der Diode heraus. Als er seinen wissenschaftlichen Betreuer Den-Baars anrief, glaubte der zwar zunächst, Schmidt erlaube sich einen Scherz. Dann aber rief er rasch den Rest der Gruppe zusammen und holte auch Präsident Yang hinzu.

Die erste nichtpolare GaN-Laserdiode arbeitete bei einer Wellenlänge von 405 Nanometern, und die Stärke des durch sie hindurchfließenden Stroms war lediglich zweibis dreimal höher als in den von Nichia und Sony damals kommerziell vertriebenen blauen c-Ebenen-Laserdioden. Das bedeutete: Mit der geringfügig stärkeren Aufheizung würden die Forscher schon fertig werden.

Nach diesem Durchbruch, der wenige Tage später auch der Rohm Company gelang – mit Licht genau derselben Wellenlänge –, entschied die UCSB-Gruppe, die Arbeiten an polaren Dioden weitgehend einzustellen und sich auf nichtpolare Dioden zu konzentrieren. Außerdem wandten sich die Forscher einer auf semipolaren GaN-Substraten beruhenden Herstellungsstrategie zu. Dafür werden Wafer unter einem Winkel von rund 45 Grad zur Hauptachse eines Kristalls geschnitten (siehe Kasten S. 35). Dies führt zwar zu etwas stärkeren inneren Feldern als im Fall von Dioden auf nichtpolaren Substraten; ihren polaren Pendanten sind sie jedoch ebenfalls deutlich überlegen. Eine der beiden Geometrien, so die Hoffnung der Forscher, würde ihnen schließlich den Weg zu einer leistungsfähigen grünen Laserdiode ebnen. Obendrein ließen sich dann Hochleistungs-LEDs für noch größere Wellenlängen entwickeln.

Auch die Wissenschaftler der Rohm Company konzentrierten sich nun auf nichtpolare und semipolare Substrate. Um in Bereiche jenseits von Blau vorzudringen, reicht deren Verwendung allein allerdings nicht aus. Grüne Dioden erfordern nämlich einen höheren Indiumanteil in der aktiven InGaN-Schicht, gleichzeitig erhöht das zusätzliche Indium aber die inneren Spannungen. So vergrößert sich die Anzahl der Kristalldefekte, wodurch die Lichtausbeute sinkt und mehr überschüssige Wärme entsteht. Zwar funktionieren LEDs meist trotzdem, doch ihre Effizienz sinkt rapide, wenn man die Farbe von Blau zu Grün verschiebt. Laserdioden sind gegenüber Defekten sogar noch weit empfindlicher.

Während man die GaN-Schichten bei Temperaturen von 1000 Grad Celsius wachsen lässt, müssen die Temperaturen bei der Herstellung von InGaN-Schichten auf 700 Grad Celsius abgesenkt werden. Sonst lösen sich die Indiumatome von den anderen Atomen ab und bilden Regionen aus inhomogenen Indi-

umlegungen. Solche Inseln führen dazu, dass die Rekombinationsenergie für Elektron-Loch-Paare von Ort zu Ort variiert; das Emissionsspektrum wird also zu breitbandig, um kohärentes, monochromatisches Laserlicht zu erhalten. Wenn während des Wachstums der Halbleiterstruktur die Temperatur in der Reaktionskammer wieder erhöht wird, um die jeweils nächste GaN-Schicht auf einer InGaN-Schicht aufzutragen, dürfen also nicht zu viele dieser Inseln entstehen. Doch je höher der Indiumanteil, desto schwieriger wird diese Aufgabe und desto sorgfältiger müssen die Forscher vorgehen.

Im Fall polarer Dioden verschärfen sich die Probleme noch. Um den starken inneren Feldern entgegenzuwirken, arbeiten die Wissenschaftler mit immer dünneren aktiven InGaN-Schichten. Sie sind mittlerweile weniger als vier Nanometer dick, bestehen also aus gerade einmal 20 Atomlagen. Dadurch rücken Elektronen und Löcher näher zusammen, und es steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sie zusammentreffen und Licht abstrahlen.

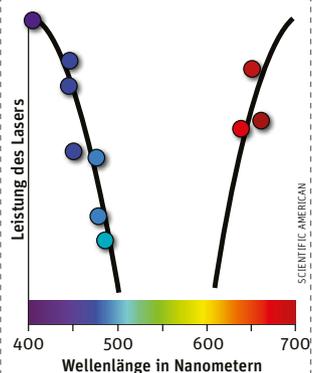
In nichtpolaren und semipolaren Dioden mit ihren nahezu vernachlässigbaren inneren Feldern können die aktiven InGaN-Schichten hingegen bis zu 20 Nanometer dick sein. Auch in solchen stabileren Schichten bilden sich zwar noch Indiuminseln. Das geschieht aber, so vermuten die Forscher, näher bei den Übergängen zu den umgebenden GaN-Schichten. Kann man die Inseln tatsächlich auf diese Zonen beschränken, stehen sie der Erzeugung eines ausreichend schmalbandigen Spektrums, wie es für einen Laser nötig ist, nicht allzu sehr im Weg. Zudem vereinfachen dickere und robustere aktive Schichten den Produktionsprozess. Dann können die Forscher auf zusätzliche Schichten verzichten, die ursprünglich dazu dienten, Photonen einzufangen und zu leiten.

### Ergebnisse folgen nun Schlag auf Schlag

Seit ihrem Durchbruch im Januar 2007 erweiterten die Arbeitsgruppen an der UCSB und bei Rohm stetig die Grenzen der neuen Technik und publizierten zahlreiche neue Ergebnisse. Im April 2007 beispielsweise berichtete die UCSB-Gruppe über eine nichtpolare LED, die blauviolett Licht mit einer Wellenlänge von 402 nm aussendet und dabei eine Quantenausbeute – das Verhältnis von abgestrahlten Photonen zu hineinströmenden Elektronen – von über 45 Prozent erreicht. Binnen nur einem Jahr hatten die Forscher die Ausbeute des Systems damit um den Faktor 100 erhöht. Einige Monate später berichtete das Team dann über eine semipolare grü-

## Binnen nur einem Jahr hatten die Forscher die Ausbeute um den Faktor 100 erhöht

### DAS PROBLEM DER GRÜNEN LÜCKE



Schon seit Langem stellen Wissenschaftler Halbleiterlaser her, die rotes Licht aussenden. Im vergangenen Jahrzehnt gelang es ihnen zudem, solche Laser für blaues und violett Licht zu entwickeln. Bei ihren Versuchen, auch in den grünen Bereich vorzustoßen, nahm die Laserleistung bisher aber meist drastisch ab.

ne LED mit einer Wellenlänge von 519 nm und einer Quantenausbeute von bis zu 20 Prozent. (Aus bislang unerklärlichen Gründen zeigen diese Dioden allerdings deutliche Blauverschiebungen.) Mittlerweile gelang es an der UCSB sogar, eine gelbe semipolare LED mit einer Wellenlänge von 563 nm und einer Quantenausbeute von über 13 Prozent herzustellen. Das war die erste effiziente gelbe LED, die auf GaN und seinen Legierungen basiert.

Unterdessen erreichten auch nichtpolare Laserdioden allmählich die Leistungsfähigkeit ihrer polaren Konkurrenz. Im Mai 2008 berichteten die Forscher der Rohm Company über eine nichtpolare Laserdiode, die Licht mit Wellenlängen von 481 nm aussendet und damit fast den damaligen Rekord polarer Dioden von 488 nm brach.



**Shuji Nakamura** (links) ist Professor für Materialwissenschaft und Direktor des Solid State Lighting and Energy Center an der University of California in Santa Barbara. 2006 erhielt der Halbleiterphysiker den Millennium Technology Prize für seine Arbeiten über blaue Laserdioden und LEDs. Als Honorarprofessor lehrte er 2004 auch an der Universität Bremen. **Michael Riordan**, der ursprünglich als Teilchenphysiker forschte, unterrichtet Physik- und Technikgeschichte an der Stanford University und an der University of California in Santa Cruz. Er ist zudem Mitverfasser populärwissenschaftlicher Bücher.

### Zähe Entwicklung

Bauteile im Labor herzustellen ist allerdings etwas ganz anderes, als sie in kommerziellen Mengen zu produzieren. Zu den größten Hindernissen für die Herstellung nichtpolarer und semipolarer GaN-Laserdioden und -LEDs – ob sie nun violett, blau, grün oder gelb strahlen – zählt weiterhin die eingeschränkte Verfügbarkeit von Substraten. Mitsubishi produziert derzeit aus kleinen Kristallen entlang der c-Ebene geschnittene GaN-Substrate mit einer Oberfläche von einem Quadratzentimeter, doch die Waferfläche muss, bei akzeptablem Preis, noch um das fast 20-Fache größer werden.

Die ökonomische Herstellung von Laserdioden erfordert, so erklärt Halbleiterexperte Robert Walker von der kalifornischen Beteiligungsgesellschaft Sierra Ventures, Substrate mit einem Durchmesser von mindestens fünf Zentimetern zu einem Preis von rund 2000 Dollar. Selbst um die einfacher herzustellenden LEDs zum Erfolg zu bringen, so Walker weiter, müssen die Substratpreise auf ein Zehntel fallen. Dann werden diese LEDs aber immer noch in Konkurrenz zu modernen blauen und grünen LEDs stehen, wie sie der britische Halbleiterspezialist Cree Research (ebenfalls ein Partner des UCSB-Zentrums), der auf Substrate aus Siliziumkarbid setzt, bereits im Jahr 2007 eingeführt hatte.

Mitsubishi bemüht sich derzeit darum, die Herstellung nichtpolarer GaN-Substrate zu kommerzialisieren. Diesen Weg müsse das Unternehmen aber langsam und mit großer Sorgfalt beschreiten, erklärt Mitsubishi-Forscher Kenji Fujito, der die Methoden für das Wachstum solcher Substrate entwickelt hat. Derzeit kann das Unternehmen gerade ausreichend nichtpolare und semipolare GaN-Sub-

strate herstellen, um den Bedarf der Forscher von Rohm und UCSB abzudecken. Und auch Fünf-Zentimeter-Wafer sind noch nicht verfügbar. Den breiten Markt, so vermutet Halbleiterexperte Walker, werden die Hersteller nichtpolarer Substrate wohl erst in einigen Jahren beliefern können.

Vorerst jedoch treiben die Forschungslabors die Entwicklung weiter voran, in immer höherem Tempo. Den Wissenschaftlern von Nichia Chemical Industries gelang es im April 2009, GaN-Laserdioden auf Basis von polaren c-Ebenen-Substraten herzustellen, die mit einer Wellenlänge von 515 nm strahlten und eine Ausgangsleistung von fünf Milliwatt besaßen. Damit dürften sie diese Technologie aber bereits bis nahe an ihre Grenze getrieben haben. Auch der Regensburger Firma Osram Opto Semiconductors gelang es, eine 515-nm-Diode zu bauen. Sie basiert auf Substraten desselben Typs, arbeitet gepulst und leistet dank einer großen Oberfläche bereits 50 Milliwatt. Allerdings setzt die Laseremission erst ab einer relativ hohen Stromdichte ein, zudem kommt es leicht zur Überhitzung der Diode.

Den tatsächlichen Durchbruch konnte indessen die Firma Sumitomo vermeiden: Auf einem semipolaren GaN-Substrat (einem anderen als dem an der UCSB verwendeten) hatten sie im Juli 2009 eine GaN/InGaN-Laserdiode aufgebaut, die Licht mit einer Wellenlänge von 531 nm emittierte – genau im Zentrum des grünen Spektralbereichs. Damit wurde die grüne Lücke noch im Jahr 2009 geschlossen, so wie wir dies bereits in »Scientific American« im April letzten Jahres vorhergesagt hatten.

Unterdessen arbeiten aber auch wir mit Hochdruck weiter. Das UCSB-Team hatte schon im September 2008 über stimulierte Emission mit Wellenlängen von 480 nm (blaugrün oder cyan) und 514 nm (grün) in nichtpolaren und semipolaren Dioden berichtet, die durch das Licht eines zweiten Lasers optisch gepumpt wurden. Und jüngst hat das UCSB-Team unter Leitung von Hiroaki Ohta, der zuvor bei Rohm arbeitete, eine grüne Laserdiode auf Basis eines semipolaren GaN-Substrats hergestellt, die bei 506 nm emittiert. Einer ihrer Vorteile: Die Schichtstruktur ist wesentlich weniger komplex als im Fall des Sumitomo-Produkts, so dass sich diese Diode viel leichter in größeren Stückzahlen herstellen lässt.

Auf dem Weg zum grünen Laser wurde im letzten Jahr ein entscheidender Durchbruch erreicht, doch das Rennen geht weiter: Nun geht es darum, in einem Spektrum von Möglichkeiten die besten zu identifizieren. <

**DenBaars, S., Nakamura, S., Speck, J.:** Non-Polar GaN Reaches Tipping Point. In: *Compound Semiconductor* 13(5), S. 21–23, 2007.

**Nakamura, S. et al.:** *The Blue Laser Diode: The Complete Story*. Springer, Heidelberg, 2. Auflage 2000.

**Metzger, R.:** New GaN Faces Offer Brighter Emitters. In: *Compound Semiconductor* 12(7), S. 20–22, 2006.

**Tyagi, A. et al.:** AlGaIn-Cladding Free Green Semipolar GaN Based Laser Diode with a Lasing Wavelength of 506.4 nm. In: *Applied Physics Express* 3, S. 0110022, 2010.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1017404](http://www.spektrum.de/artikel/1017404).